

Study of Transmission Properties Base on One-Dimensional Photonic Crystal with Defect

Yan Gao, Hai-feng Wang

Department of Physics, Teachers College, Shihezi University, Shihezi, China

Email: g.y.213@163.com

Abstract: The transmission properties of one-dimensional photonic crystal with one defect is studied by using transfer matrix method. It is found that the intensity and position of the defect mode lie on the refractive index and the layer's thickness. A sharp transmission peak appears in the forbidden band when the refractive index of defect is appropriate, and we can change its position through adjusting the thickness of medium layer.

Keywords: photonic crystal; defect mode; band gap; filter

缺陷一维光子晶体传输特性的研究

高艳,王海锋

石河子大学师范学院物理系, 石河子, 中国, 832003

Email: g.y.213@163.com

摘要: 利用传输矩阵法, 研究了含一个缺陷的一维光子晶体的透射谱。结果表明, 缺陷模的强度及位置与杂质的折射率和厚度之间存在着非线性关系, 若缺陷的折射率取适当值, 在禁带中可以出现一个尖锐的透射峰, 且通过调节厚度可以改变缺陷模的位置。

关键词: 光子晶体; 缺陷模; 带隙; 滤波

1 引言

光子晶体是一种介电函数呈周期性变化的人工微结构材料, 其典型结构为一个折射率周期变化的物体, 自 1987 年 John 和 Yablonovitch 分别提出光子晶体和光子能带的概念^[1-2], 随着光通讯和光传感技术的发展, 人们对光子晶体进行了广泛的理论与实验研究^[3-6]。迄今为止, 人们对光子晶体的研究已有二十余年, 无论在理论上还是实践中都取得了重要进展。光子在这类材料中的行为类似电子在凝聚态物质(半导体)中的行为。带隙分布和传输特性是光子晶体研究的核心内容, 每一种光子晶体的设计和研究都要从其带隙结构出发。由于光子晶体带隙的存在, 可以通过设计和调节光子带隙达到控制光子运动的目的, 因此光子晶体在许多方面有着重要的应用, 如光子晶体激光器、光子晶体滤波器、光子晶体光纤、光子晶体偏振片、光子晶体天线、光子激光二极管

资助信息: 石河子大学高层次人才科研启动基金资助项目(项目编号 RCZX200745)。

等。并且通过改变材料的介电函数或改变原胞的大小, 可以调制光子晶体的带隙的位置和宽度。所以, 可以像裁剪半导体的能带那样, 构造限制光子运动的光子晶体量子阱。为了得到更高性能的光子晶体, 人们在光子晶体中引入缺陷^[7], 与半导体中的杂质能级类似, 通过在光子晶体中引入缺陷或杂质将在带隙中产生定域的电磁波模式, 光子晶体中引入缺陷后在禁带中出现的缺陷模称为光子局域, 由于缺陷位置的变化、厚度以及折射率和介电常数都能导致缺陷模的变化。所以可以通过改变缺陷的性质来获得需要的光子晶体量子阱。

对于光子晶体的理论计算方法, 比较成熟的有平面波法^[8]、时域有限差分法^[9]和传输矩阵法等^[10], 对于一维光子晶体, 传输矩阵法具有计算简单, 结果与实际相符等优点, 因此被广泛采用。本文主要利用传输矩阵方法, 从理论上研究掺杂物质的折射率和厚度变化对一维光子晶体中光的传播特性的影响。

2 晶体结构与计算方法

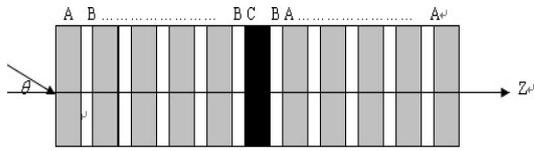


Figure 1. The model of 1D photonic crystal
图 1. 一维光子晶体模型

上图所示为由 A、B 两种材料沿 Z 轴方向交替生长形成的一维光子晶体，且均为正折射率材料，两种介质材料的折射率分别为 n_A 、 n_B ，实际厚度分别为 d_A 和 d_B ，晶格周期为 $d = d_A + d_B$ ，若在这个一维光子晶体中掺入缺陷 C 后，就形成了缺陷一维光子晶体。这里所加的缺陷 C 仍为正折射率材料，其折射率和厚度分别为 n_c 和 d_c 。

以 TE 波（横电波）为例，当 TE 波从空气中正入射到该结构时，位于 $z + \Delta z$ 和 z 处的电场分量和磁场分量通过以下转移矩阵^[11, 12]相连接：

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos(k_j \Delta z) & -\frac{i}{n_j} \sin(k_j \Delta z) \\ -in_j \sin(k_j \Delta z) & \cos(k_j \Delta z) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $k_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j$, $j = A, B, C$ ， Δz 为第 j 层介质层的厚度， λ 为入射波的波长，假设连接入射端电磁场和出射端电磁场的矩阵为 $X_N(\lambda)$ ，表达式为

$$X_N(\lambda) = \prod_{j=1}^N M_j(\Delta z, \lambda) \quad (2)$$

其中，N 表示结构的总层数，经过简单计算，可得该结构的透射系数为

$$t(\lambda) = \frac{2p_1}{(M_{11} + M_{12}p_1)p_1 + (M_{21} + M_{22}p_1)} \quad (3)$$

透射率则为 $T = \frac{p_l}{p_1} |t|^2$

其中， M_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为 $X_N(\lambda)$ 的矩阵元， p_1 表示该结构左侧接触的外界环境系数， p_l 表示该结构右侧接触的外界环境系数，若该一维光子晶体置于空气中，则 $p_1 = p_l = 1$ 。

3 数值计算与分析

对于上面的一维光子晶体模型，取 A、B 两种介质的折射率分别为 1.3 和 3.23，中间的杂质层为普通

正折射率材料，本文详细研究了掺入杂质的折射率及厚度对由 A、B 两种材料组成的一维光子晶体透射特性的影响。

为方便计算，取两介质层的光学厚度 $h_A = h_B = h = \lambda_0/4$ (λ_0 是中心波长， $\lambda_0 = 1.5 \times 10^{-6} m$)，设光是从空气中穿过光子晶体的，即 $p_1 = p_l = 1$ 。以 TE 波为例，不考虑传输过程中的电磁损耗，我们讨论波长范围在 $(0.5 \sim 2.5) \times 10^{-6} m$ 时，杂质对光子晶体传输特性的影响。

下图 2 所示为没有掺入杂质时，由 A、B 两种材料构成的周期性一维光子晶体的透射谱。从图中可以看出在 $(1.18 \sim 2.04) \times 10^{-6} m$ 波长范围内有完整的禁带。

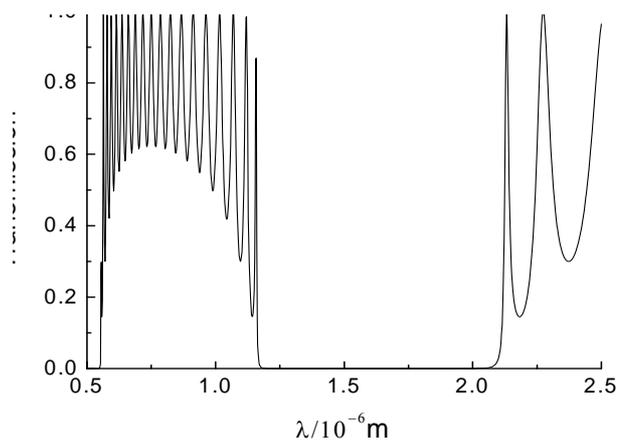


Figure 2. The transmission of one-dimensional photonic crystal without defect

图 2. 无掺杂时一维光子晶体透射谱

3.1 杂质折射率变化对带隙的影响

在研究 n_c 对传输特性的影响时，为方便计算，我们设定 C 的光学厚度保持不变，且 $h_C = h_A = h_B = \lambda_0/4$ ，图 3 所示为杂质 C 折射率小于或等于 n_A 时，缺陷光子晶体的透射谱。从图中可以看出，当 $n_c \leq n_A$ 时，掺入杂质后，在禁带中 1840nm 处产生了明显的缺陷膜，但是没有改变禁带的宽度和位置，且随着折射率的增加，缺陷模的强度逐渐减小，但缺陷模位置不变。

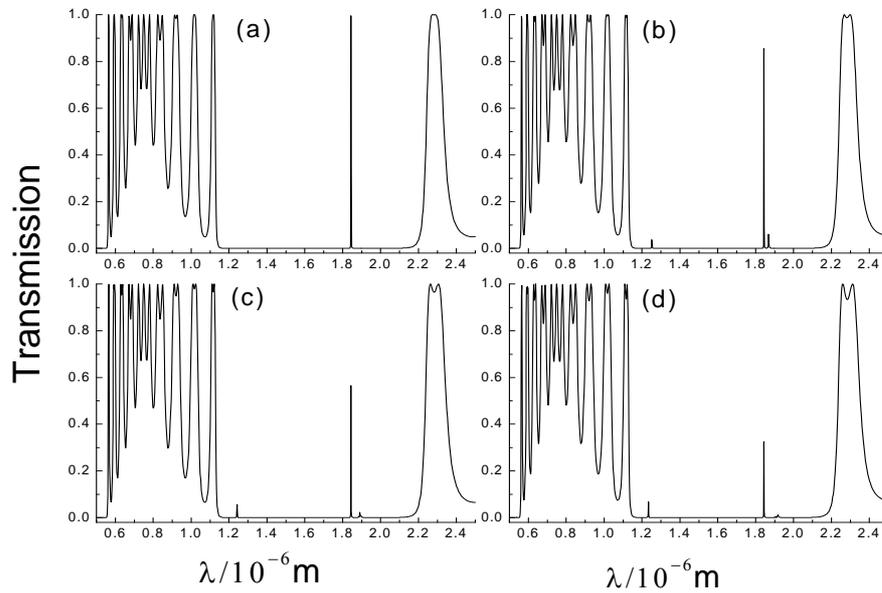


Figure 3. The transmission of 1D photonic crystal for different n_c : (a) $n_c = 1.0$, (b) $n_c = 1.1$, (c) $n_c = 1.2$, (d) $n_c = 1.3$

图 3. n_c 取不同值时光子晶体的透射谱: (a) $n_c = 1.0$, (b) $n_c = 1.1$, (c) $n_c = 1.2$, (d) $n_c = 1.3$

当 C 的折射率继续增大, 在 $n_A < n_C < n_B$ 时, 该模型光子晶体透射谱如图 4 所示,

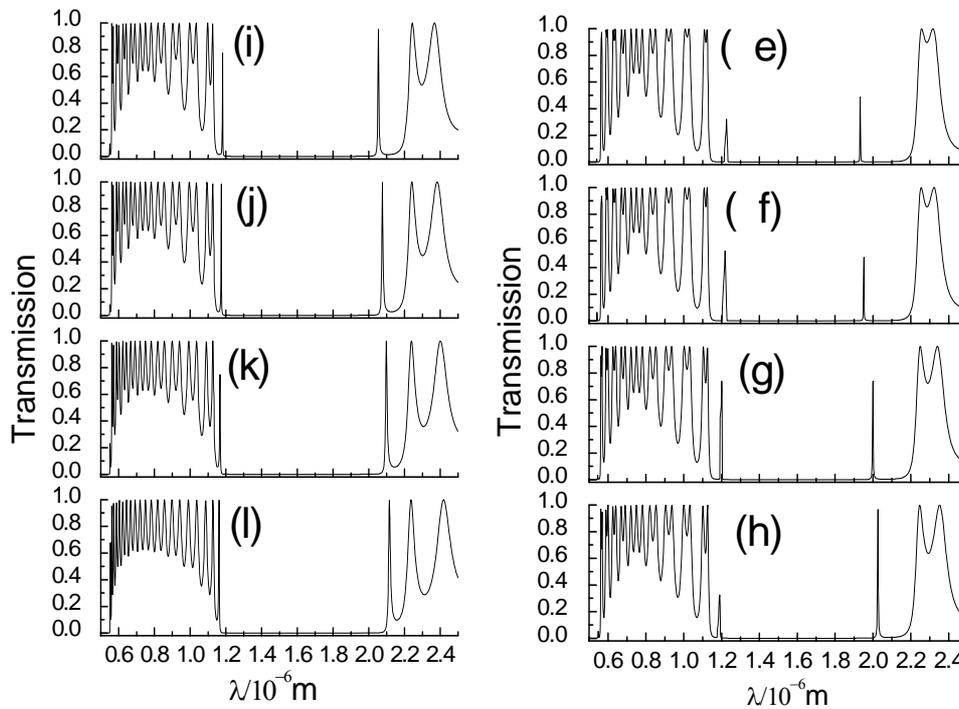


Figure 4. The transmission of 1D photonic crystal for different n_C : (e) $n_C = 1.4$, (f) $n_C = 1.5$, (g) $n_C = 1.8$, (h) $n_C = 2.0$, (i) $n_C = 2.25$, (j) $n_C = 2.5$, (k) $n_C = 2.8$, (l) $n_C = 3.1$

图 4. n_C 取不同值时光子晶体的透射谱: (e) $n_C = 1.4$, (f) $n_C = 1.5$, (g) $n_C = 1.8$, (h) $n_C = 2.0$, (i) $n_C = 2.25$, (j) $n_C = 2.5$, (k) $n_C = 2.8$, (l) $n_C = 3.1$

从图中可以看出, 当 $n_A < n_C < n_B$ 时, 在 e、f、g、h 四幅图中, 缺陷膜又有增大的趋势, 但通过仔细对比分析发现, 不是缺陷模增大, 而是在缺陷模附近引起了震荡, 使得原来出现缺陷模的位置变成了有震荡的透射峰, 这在 i、j、k、l 四幅图中可以很明显的看出来。尤其是最后一幅图中, 几乎看不出缺陷模的存在, 中间部分变成了完整的禁带, 并且禁带宽度与

不掺杂杂质时的图 2 相比几乎没有发生变化。可以看出当杂质的折射率接近 n_B 时, 对光子晶体透射谱的影响很小。

当 C 的折射率继续增大到 $n_C > n_B$ 后, 禁带内不再有缺陷模出现, 只是禁带宽度稍微有所变大, 如图 5 所示。

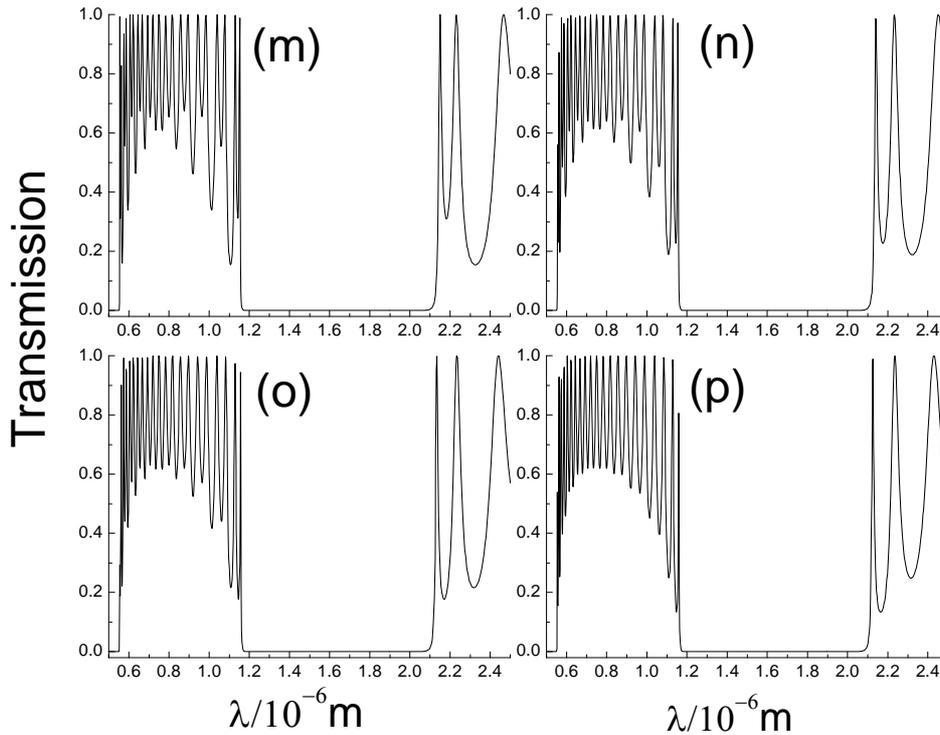


Figure 5. The transmission of 1D photonic crystal for different n_C : (m) $n_C = 3.3$, (n) $n_C = 3.5$, (o) $n_C = 3.7$, (p) $n_C = 4.0$

图 5. n_C 取不同值时光子晶体的透射谱: (m) $n_C = 3.3$, (n) $n_C = 3.5$, (o) $n_C = 3.7$, (p) $n_C = 4.0$

3.2 杂质厚度变化对带隙的影响

研究 d_C 对传输特性的影响时, 为简化计算过程, 设定 $n_C = 1$ 保持不变。分别计算 C 的光学厚度为 A、

B 的光学厚度的 2 倍、4 倍、8 倍、16 倍、1/2、1/4、1/8 及 1/16 时情况。

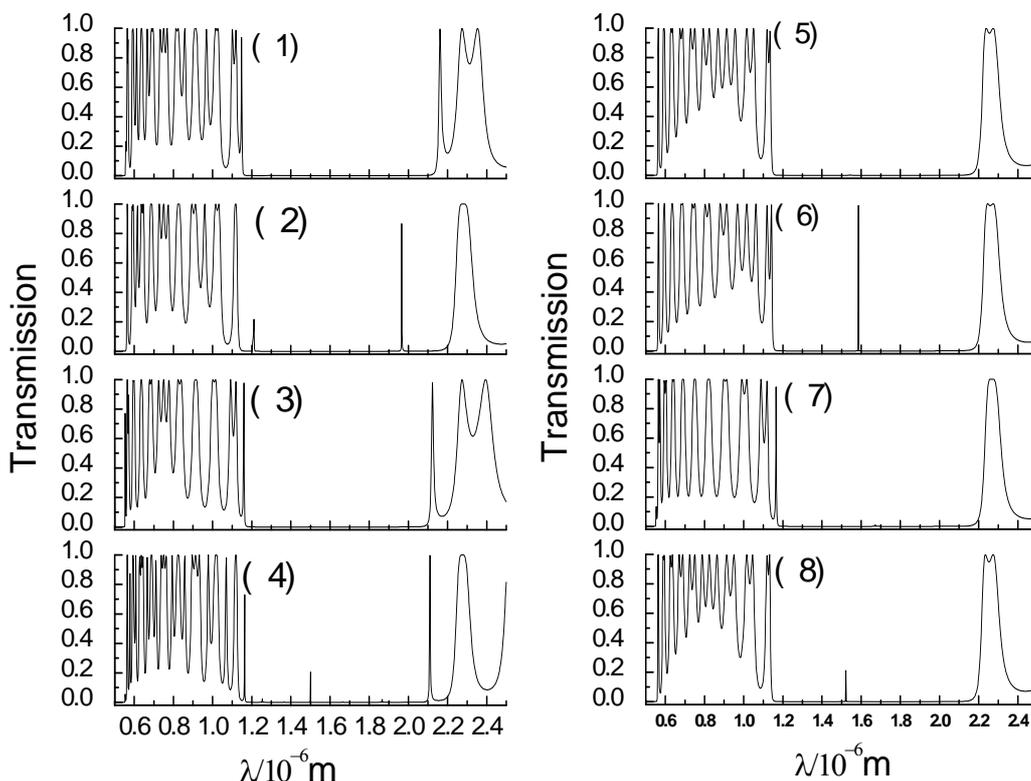


Figure 6. The transmission of 1D photonic crystal for different d_C : (1) $h_C = 2h$, (2) $h_C = 4h$, (3) $h_C = 8h$, (4) $h_C = 16h$,

$$(5) h_C = \frac{1}{2}h, (6) h_C = \frac{1}{4}h, (7) h_C = \frac{1}{8}h, (8) h_C = \frac{1}{16}h$$

图 6. d_C 取不同值时光子晶体的透射谱: (1) $h_C = 2h$, (2) $h_C = 4h$, (3) $h_C = 8h$, (4) $h_C = 16h$, (5) $h_C = \frac{1}{2}h$, (6) $h_C = \frac{1}{4}h$,

$$(7) h_C = \frac{1}{8}h, (8) h_C = \frac{1}{16}h$$

从图 6 中我们可以很明显的看出，只有当 $h_C = 4h$ 和 $h_C = 1/4h$ 时有明显的缺陷模，这两种情况下，缺陷模强度基本相同，但位置明显不同。所以可以通过改变杂质的厚度来改变缺陷膜的位置，据此可以设计不同波长的滤波器。但由这八副图可以看出，无论取哪个厚度时，对带隙宽度的影响都很小。

4 总结

本文设计了一个含一个缺陷的一维光子晶体模型，利用传输矩阵法研究了杂质的折射率和厚度对光子晶体带隙的影响。发现只有使杂质的折射率小于模型中较小的折射率时，才有明显的强度较大的缺陷模出现，同样厚度对带隙的影响也很明显，只有

$h_C = 4h$ 和 $h_C = 1/4h$ 时，在不同位置有较强的缺陷模出现。但折射率和厚度仅对缺陷模的强度和位置有所影响，而对整个禁带的宽度几乎毫无影响。这种缺陷一维光子晶体结构有利于窄带滤波器的设计。

References (参考文献)

- [1] E.Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2059-2062.
- [2] S.John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58: 2486-2489.
- [3] Hui Wang, Yongping Li. An Eigen Matrix Method for Obtaining the Band Structure of Photonic Crystals[J]. *Acta. Physica Sinica*, 2001, 50(11): 2172-2178(Ch).
王辉,李永平.用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, 50(11): 2172-2178.
- [4] Rong Li, Kun Ren, Xiaobin Ren *et al.*. Angular and Wavelength of Band gaps of holographic Photonic Crystal for different Pola-

- rizations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(8): 2520-2525 (Ch).
李蓉, 任坤, 任晓斌等. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J]. *物理学报*, 2004, 53(8): 2520-2525.
- [5] Xiyu Su, Yan Gao, Haifeng Wang. Optical Transmission Properties of One-dimensional Ferromagnetic Material Photonic Crystal[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2007, 13(2): 134-137(Ch).
苏希玉, 高艳, 王海锋. 一维铁磁材料光子晶体的光学传输特性[J]. *量子光学学报*, 2007, 13(2): 134-137.
- [6] Lingyun Yan, Peide Han, Jing Chen, Caili Zhang *et al.* Effect of Inserted Metal Ag Layer on Photonic Band Gap of One-dimensional C60/AlN Photonic Crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 277-280(Ch).
闫凌云, 韩培德, 谌静, 张彩丽等. 金属插层对 C₆₀/AlN 一维光子晶体带隙的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 277-280.
- [7] Yongqing Huang. Defect Mode and Transmission Spectrum of One-dimensional Photonic Crystals Containing Single-negative Material[J]. *Jiangxi Science*, 2009, 27(6): 786-789(Ch).
黄永清. 含单负材料的光子晶体的缺陷模和透射谱[J]. *江西科学*, 2009, 27(6): 786-789.
- [8] W.C.Sailor, F.M.Mueller, P.R.Villeneuve. Augment-plane-wave method for photonic band-gap materials[J]. *Phys Rev B*, 1998, 57(15): 8819-8822.
- [9] J.B.Pendry, A.Mackinnon. Calculation of photon dispersion relation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69: 2772-2775.
- [10] W.H.Butler. One-dimensional model for transition metals and their alloys[J]. *Phys. Rev. B*, 1976, 14(2): 468-478.
- [11] Weizong Chen, Ying Shen, Manli Hu *et al.* Structure of Basic Period of One-dimensional Photonic Crystal and The Characters of Forbidden Bands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30 (12): 1453-1456 (Ch).
陈慰宗, 申影, 忽满利等. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征[J]. *光子学报*, 2001, 30 (12): 1453-1456.
- [12] Bingzhong Wang. *Computational Electromagnetics* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 20-85.
王秉中. *计算电磁学*[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 20-85.